

ANÁLISE QUALITATIVA DO FLUXO DE VEÍCULOS E DA PERFORMANCE ENERGÉTICA COMPARANDO MODELO MICROSCÓPICO CONTÍNUO E DISCRETO EM RELAÇÃO À VELOCIDADE

Maurício P. M. de Novaes Santos
Fernando Wesley C. de Araújo
Guilherme Medeiros S. de Andrade
Fábio S. Magnani

Universidade de Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências

RESUMO

Modelos microscópicos são usados em diversos simuladores de tráfego para representar o fluxo de veículos. O principal objetivo deste trabalho é comparar dois modelos microscópicos, um contínuo e outro discreto em relação à velocidade. Diferentes combinações de densidades de carros e motos foram simuladas em uma pista oval de faixa única com 7,5 km. Os resultados mostraram que os modelos têm comportamento parecidos em relação ao fluxo de veículos quando existem poucas motos na pista. No entanto, o modelo discreto sobrestimou o consumo de combustível na maioria dos casos analisados. A diminuição do valor de aceleração no modelo discreto não resultou em grandes diferenças nos resultados de fluxo. Um valor menor da aceleração no modelo discreto diminuiu a diferença do consumo de combustível em relação ao modelo contínuo, mas o valor ainda é alto em vários dos casos. Por fim, ambos os modelos requereram aproximadamente o mesmo tempo de simulação.

ABSTRACT

Microscopic models are used in several traffic simulators to represent the traffic flow. The main objective of this study is to compare two microscopic models, one continuous and other discrete in speed. Different densities of car and motorcycles were simulated in a single-lane oval track of 7.5 km. The results indicated that the models present similar behaviors in relation to the traffic flow when there are few motorcycles on the track. However, the discrete model overestimated the fuel consumption in the most of the cases analyzed. The decrease of the acceleration value in the discrete model did not result in large differences in the traffic flow. A lower value of acceleration in the discrete model reduced the difference of fuel consumption in comparison to the continuous model, but the value is still high in several cases. Finally, both models required approximately the same time of simulation.

1. INTRODUÇÃO

Modelos de tráfego são ferramentas para análise, previsão e descrição do fluxo de veículos. Esses modelos são desenvolvidos desde o início do século XX (van Wageningen-Kessels *et al.*, 2015), associados com a necessidade de um melhor planejamento de tráfego devido aos problemas sociais, econômicos e ambientais resultantes de um crescente número de veículos nas vias.

Os modelos de tráfego são divididos em três grupos principais: microscópico, mesoscópico e macroscópico. No primeiro o movimento de cada veículo é modelado de maneira que o fluxo de veículos é resultado da interação entre cada veículo na pista; no último o tráfego é considerado como um todo, tal qual um fluido em um duto. Por fim, o modelo mesoscópico é comumente descrito como um modelo intermediário entre as duas abordagens anteriores. Mesmo dentro desses grupos é comum existir inúmeras subdivisões. Neste trabalho serão usados dois modelos pertencentes na classificação de modelos microscópicos: modelos contínuos e discretos em relação à velocidade.

A maior parte dos modelos microscópicos se encaixam na subdivisão de *car following* (“veículo seguidor”), em que simula o comportamento de um veículo quando tem outro em sua frente. Um dos modelos mais antigos foi desenvolvido por Pipes em 1953, o qual funciona seguindo uma regra que determina a distância entre dois veículos consecutivos (van Wageningen-Kessels

et al., 2015). Um modelo bastante usado dessa subdivisão é o modelo de Gipps (1981), que está presente em softwares como SUMO, MOVSIM, AIMSUN e DRACULA (Ciuffo *et al.*, 2012). Esse modelo é contínuo em relação ao espaço (a velocidade pode assumir qualquer valor desde que não resulte em colisão e respeite o desejo do piloto) e discreto no tempo. O modelo de Gipps quando calibrado é capaz de reproduzir o tráfego de maneira adequada (Asaithambi *et al.*, 2018; Kanagaraj *et al.*, 2013; Mathew e Ravishankar, 2011; Zheng *et al.*, 2012).

Outro modelo bastante utilizado para entender as interações entre veículos no tráfego é o modelo de Autômato Celular (AC), o qual é discreto em relação ao espaço e tempo. Nesses modelos o espaço é dividido em células (áreas da pista de comprimento fixo), as quais podem estar vazias ou ocupadas por um veículo. Dessa maneira, veículos apenas podem trafegar com velocidades múltiplas ao tamanho da célula. Portanto, esses modelos também são discretos em relação à velocidade. Os modelos AC são reconhecidos por sua capacidade de capturar características do tráfego a partir de regra simples e requererem menos tempo para simulação (Bogo *et al.*, 2015). Meng *et al.* (2007) propuseram um modelo AC baseado no modelo de NaSch (um dos modelos AC mais citados na literatura) para estudar qualitativamente o tráfego de carros e motos na China, e concluíram que regra de prioridade de carros na faixa da esquerda não impacta no fluxo de carros sob condições periódicas de contorno. Além disso, em um estudo que utilizou dados de uma rodovia na Califórnia indicou que o modelo de NaSch foi o único que reproduziu satisfatoriamente o tráfego sob condições diferentes da utilizada para calibração (Zheng *et al.*, 2012).

Neste trabalho serão apresentados dois modelos: um contínuo na velocidade baseado no modelo de Gipps (1981) e um discreto na velocidade baseado no modelo Autômato Celular desenvolvido por Meng *et al.* (2007). Esses dois modelos serão usados para analisar qualitativamente o fluxo de veículo e a performance energética (consumo de combustível e emissão de CO₂) dos veículos em uma pista circular de faixa única.

2. METODOLOGIA

Nesta seção os modelos contínuos (MC) e discretos (MD) serão apresentados, assim como será descrito como foi calculado o consumo de combustível de cada veículo. O estudo representa carros e motos trafegando em conjunto em uma pista oval de faixa única. Nesta análise apenas as motos podem trafegar ao lado de outro veículo, o que será referenciado no texto como mudança de posição na faixa, como mostrado na Figura 1. O estudo é realizado com combinações de várias densidades de carros e motos com o objetivo capturar diferentes estados de tráfego, como fluxo livre e congestionado.

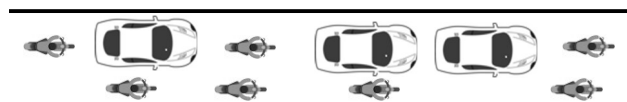


Figura 1: Cenário de simulação

2.1. Modelo de tráfego

Em ambos os modelos, é inicialmente determinado se existe ou não mudança de posição na faixa. A mudança ocorrerá de forma instantânea se duas condições forem respeitadas: não resultar em colisão (segurança) e se existir vantagem, isto é, se o veículo poderá trafegar mais rapidamente. Em seguida a velocidade do veículo é atualizada, levando em conta as limitações de aceleração, velocidade máxima e segurança.

2.1.1. Modelo contínuo (MC)

No MC é considerado que a atualização da velocidade ocorre com aceleração constante em dado intervalo de tempo (Δt). O modelo utilizado para calcular a máxima velocidade que garante que não exista colisão, V_{seg} , é baseado no modelo de Gipps (1981), Equação 1. Nesse modelo é usado parâmetros como a distância em relação ao veículo líder (entre para-choque dianteiro e traseiro), a desaceleração máxima e o tempo de reação para garantir que não exista choque entre veículos. Duas simplificações foram aplicadas no modelo de Gipps para resultar na Equação 1: todos os veículos na pista têm a mesma desaceleração máxima e o tempo de atraso de reação foi considerado nulo.

$$V_{seg} = \left(b \frac{\Delta t}{2} \right) + \sqrt{\left(-b \frac{\Delta t}{2} \right)^2 + \left(V_{(t)}^+ \right)^2 - b \left[2 \left(gap^+ - d_{min} \right) - V(t) \Delta t \right]} \quad (1)$$

Onde:

b = máxima desaceleração usada pelo motorista (m/s^2), sempre valor negativo

Δt = Tempo de reação e de atualização do sistema (s)

d_{min} = Distância mínima desejada pelo piloto em relação ao veículo líder (m)

gap^+ = Distância em relação ao veículo líder (m)

$V(t)$ = Velocidade do veículo (m/s)

$V_{(t)}^+$ = Velocidade do veículo líder (m/s)

A velocidade de segurança é importante para garantir que veículos não colidam ao mudar de posição na faixa ou ao trafegar. A mudança de posição faixa ocorre de forma instantânea antes da atualização de velocidade em cada instante de tempo e funciona da seguinte maneira, utilizando a motocicleta de placa A como exemplo (Figura 2): 1º) é verificado se existe espaço em relação aos veículos de placa C e D; 2º) utilizando a Equação 1 é checado se a mudança de posição irá requerer uma frenagem ($[V_{seg} - V(t)] / \Delta t$) maior que b em módulo, isto é, se o veículo D irá bater no veículo A e se o veículo A irá colidir com o veículo C; 3º) uma vez que é verificado que não existirá choque entre os veículos, a mudança de posição apenas ocorrerá se a velocidade de segurança do veículo A em relação ao veículo C for maior que a velocidade de segurança em relação ao veículo B (o que significa que existe vantagem).

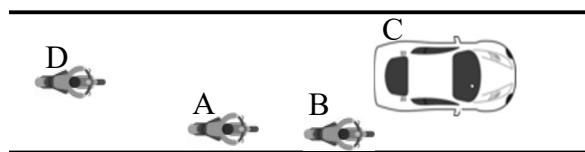


Figura 2: Veículos com placa A, B, C e D trafegando em pista de faixa única

Após a determinação se haverá ou não mudança de posição na faixa, será determinado a nova velocidade de cada veículo. No modelo contínuo, a nova velocidade do veículo (V_{MC}) será determinada de maneira a respeitar o limite de velocidade da pista, o limite de aceleração imposto pelo piloto e as condições de segurança, Equação 2. Como o veículo somente alcançará a velocidade desejada (V_{MC}) após Δt com aceleração constante, o deslocamento do veículo nesse intervalo de tempo é dado por: $[V(t) + V(t+\Delta t)] \Delta t / 2$.

$$V_{MC} = V(t+\Delta t) = \min(V_{max}, V_{seg}, V(t) + a_{max} \Delta t) \quad (2)$$

Onde:

V_{\max} = Velocidade máxima do veículo (m/s)
 a_{\max} = Máxima aceleração usada pelo piloto (m/s²)

Além disso, cada veículo na pista tem probabilidade de frenagem aleatória (p) com o valor de b . Essa frenagem tem o objetivo de representar a imperfeição ao se dirigir e introduzir imprevisibilidade ao sistema.

2.1.2. Modelo discreto (MD)

O modelo discreto (MD) corresponde à adaptação do MC para se tornar discreto em relação à velocidade, Equação 3. Esse modelo foi baseado em um modelo AC proposto por Meng *et al.* (2007) para estudar o tráfego misto de motocicletas e carros. Assim como em modelo Autômato Celular, no MD as velocidades são sempre múltiplas a uma constante. Os veículos apenas aceleram com um único valor (a_d), desaceleram com qualquer valor inteiro múltiplo a a_d ou mantêm a velocidade constante. Além disso, a mudança de velocidade ocorre de forma instantânea, o que simplifica a determinação de uma velocidade que não resulte em colisão, pois o veículo pode até parar instantaneamente (nesse modelo o deslocamento é calculado pela multiplicação da velocidade (V_{MD}) por Δt). A atualização de velocidade no MD depende da aceleração discreta de segurança ($a_{d,seg}$), parâmetro que corresponde ao valor máximo de aceleração instantânea que garante a não colisão. As variáveis a_d e $a_{d,seg}$ necessárias para fazer o modelo funcionar como um modelo Autômato Celular.

$$V_{MD} = \begin{cases} V(t), & \text{para } 0 \leq a_{d,seg} < a_d \\ \min(V_{\max}, V(t) + a_d \Delta t), & \text{para } a_{d,seg} \geq a_d \\ V(t) + \left\lfloor \frac{a_{d,seg}}{a_d} \right\rfloor a_d \Delta t, & \text{para } a_{d,seg} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Onde:

a_d = Aceleração única do modelo discreto (m/s²)

$$a_{d,seg} = \left[\min(V_{\max}, \frac{gap^+ - d_{\min}}{\Delta t}) - V(t) \right] / \Delta t$$

$$\left\lfloor \frac{a_{d,seg}}{a_d} \right\rfloor = \max \left\{ n \in Z \mid n \leq \frac{a_{d,seg}}{a_d} \right\}$$

No MD a troca de faixa também ocorre de forma instantânea e segue as mesmas regras propostas por Meng *et al.* (2007). Como a mudança de velocidade ocorre de forma instantânea, a não ocorrência de colisão é assegurada se a velocidade de uma motocicleta, por exemplo de placa A (Figura 2), for menor que a distância em relação ao veículo na sua frente (placa C); e se a distância em relação ao veículo imediatamente atrás (placa D) for menor que a velocidade máxima permitida na pista (V_{\max}).

Assim como o modelo contínuo, no MD também existe uma probabilidade p de frenagem aleatória. No MD a frenagem aleatória ocorre com o valor de a_d . Destaca-se que no modelo proposto por Meng *et al.* (2007) as motos e carros apenas trafegam com velocidade múltiplas a 3,75 m/s. Enquanto nesse trabalho a velocidade corresponderá sempre a um múltiplo de 3,0 m/s no MD.

2.2. Modelo de consumo

O consumo instantâneo em cada intervalo de tempo (C) é determinado pela divisão da potência usada nas rodas (Pot) pela eficiência de transmissão (η_{transm}), rendimento do motor (η), e pelo poder calorífico do combustível (PC) em MJ/l, Equação 4. Além disso, no modelo foi considerado que durante a frenagem o veículo não consome combustível, e que consome C_{parado} quando parado.

$$C = \begin{cases} 0, & \text{para } Pot < 0 \\ \frac{Pot}{\eta_{transm}\eta PC}, & \text{para } Pot > 0 \\ C_{parado}, & \text{para } Pot = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Onde:

$$Pot = V(t) \left[K_A V(t)^2 + mgC_r \right] + m \left[\frac{V(t+\Delta t)^2 - V(t)^2}{2\Delta t} \right]$$

K_A = fator aerodinâmico (kg/m)

C_r = fator de rolagem

m = massa do conjunto piloto/veículo (kg)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

Neste estudo o rendimento do motor foi modelado utilizando duas expressões empíricas disponíveis na literatura: uma proposta por Ben-Chaim *et al.* (2013) que fornece o rendimento do motor em função da potência usada (Pot), potência máxima disponível no motor (P_{disp}) e de uma constante (rendimento máximo (η_{max})); e outra desenvolvida por Ni and Henclewood (2012) que representa a curva de potência (*i.e.*, P_{disp} em função da rotação do motor (ω) e constantes disponíveis nos manuais dos veículos (rotação em que ocorre torque máximo (ω_t), rotação em que ocorre a potência máxima (ω_p) e potência máxima (P_{max})). Quando as duas expressões são usadas em conjunto o rendimento se torna função das seguintes variáveis: rotação do motor, da potência usada e da potência disponível do motor, Equação 5. A rotação do motor é um parâmetro importante para o modelo, portanto é necessário considerar o sistema de transmissão do veículo. As relações de transmissão para cada marcha são disponibilizadas nos manuais dos veículos. Nesse trabalho a marcha será selecionada de maneira em que o veículo tenha sempre o maior torque disponível ($T = P_{disp}/\omega$).

$$\eta = \eta_{max} \left[0,23 + 1,06\alpha + 0,82\alpha^2 - 1,21\alpha^3 \right] \left[0,7 + \beta + 1,06\beta^2 - 0,31\beta^3 \right] \quad (5)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{Pot}{P_{disp}} = \frac{Pot}{\left[\left(P_{max} (3\omega_p - \omega_t) \omega \right) / \left(2\omega_p^2 \right) - \left(P_{max} (\omega - \omega_t)^2 \omega \right) / \left(2\omega_p^2 (\omega_p - \omega_t) \right) \right]}$$

$$\beta = \frac{\omega}{\omega_p}$$

2.3. Parâmetros de simulação

O cenário de simulação, é uma pista oval com comprimento de 7,5 km em que apenas as motos podem mudar de posição na faixa única (Figura 3). Esse cenário foi baseado no estudo de tráfego misto realizado por Meng *et al.* (2007) com as seguintes características: as densidade

de motos (ρ_m) são de 0; 13,33; 40; 93,33 e 186,66 motos/km combinado com densidades de carros (ρ_c) de 0 a 160 carros/km, em intervalos de 10 carros/km na pista. A simulação foi realizada para o tempo que corresponde a 11.000 segundos ($\Delta t=1s$), mas nos primeiros 10.000 segundos os dados do sistema não são registrados, pois este tempo é considerado como de ajuste do sistema. Inicialmente, carros e motos são distribuídos na pista aleatoriamente. Além disso, durante a simulação os veículos têm 10% de probabilidade de desacelerar aleatoriamente.

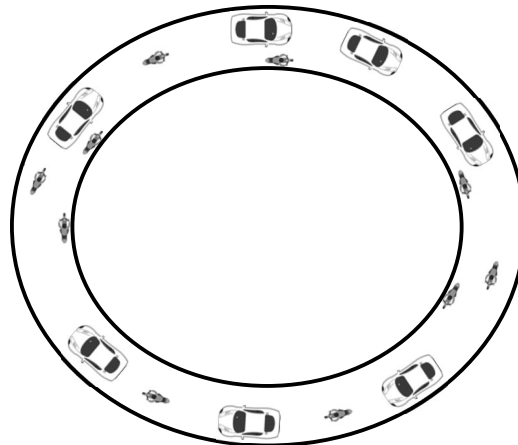


Figura 3: Pista oval usada para simulação

Para os cálculos de consumo (Equações 4 e 5), foi considerado a combustão completa de iso-octano com PC de 32,3 MJ/l. Os veículos simulados foram um Fiat Palio 1.0 ($m = 940$ kg, $\omega_t = 4500$ rpm, $\omega_p = 6250$ rpm, $P_{\max} = 53,7$ kW) e uma Honda CG125 ($m = 107$ kg, $\omega_t = 6000$ rpm, $\omega_p = 8250$ rpm, $P_{\max} = 8,5$ kW), para os quais foi considerado a mesma eficiência de transmissão de 95%. Além disso, foi assumido um rendimento máximo (η_{\max}) de 45% para o carro e de 40% para a moto. No cálculo de velocidade (Equações 1, 2 e 3) foi considerado que os carros possuem 4 metros e as motos 2 metros de comprimento, e devem manter uma distância mínima (d_{\min}) de 2 metros e 1 metro em relação ao veículo líder, respectivamente. A velocidade máxima (V_{\max}) é de 108 km/h (valor elevado para representar condições de estrada em condições de tráfego livre). Outros valores usados no modelo são citados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros usados no modelo

Parâmetro	Valor	Equação	Fonte
b (m/s^2)	-3,0	1	Pande e Wolshon (2016)
a_{\max} (m/s^2)	3,0	2	Long (2000)
a_d (m/s^2)	3,0	3	
$K_{A,carro}$ (kg/m)	0,45	4	Kühlwein (2016)
$K_{A,moto}$ (kg/m)	0,25	4	Hucho (2005) e Cossalter (2006)
C_r	0,02	4	Cossalter (2006)
$C_{parado,carro}$ (l/h)	0,65	4	Richard Van Basshuysen (2002)
$C_{parado,moto}$ (l/h)	0,15	4	Sharma <i>et al.</i> (2018)

3. Resultados e discussão

Os modelos usados são de fácil implementação e bastante utilizados para estudo de tráfego. A grande diferença entre eles está nas velocidades em que os veículos trafegam. Enquanto no modelo discreto o veículo só pode ter velocidades com valores múltiplos de 3 m/s (ou 10,8 km/h), no modelo contínuo os veículos podem ter qualquer velocidade entre 0 e 108 km/h.

Como resultado disso, é observado na Figura 4a que no modelo discreto, linha na cor preta, os veículos passam mais tempo trafegando na velocidade mais alta em comparação com o modelo contínuo quando existem apenas 300 carros na pista. Os resultados, Figura 4a, também indicam que o veículo do modelo discreto passa mais tempo parado (38 segundos no MC e 126 segundos no MD).

Ambos os modelos conseguem representar comportamentos esperados em condições de tráfego livre e tráfego congestionado em nível microscópico. Observa-se na Figura 4b as linhas da trajetória de diversos veículos na pista ao longo do tempo. Na condição analisada, 300 carros ($\rho_c = 40$ carros/km), é reproduzido fluxo de veículos trafegando com velocidade constante (visto pelas linhas paralelas com inclinação relativamente constante) e regiões congestionadas que se propagam na pista como uma onda (representada pela região em que as linhas estão concentradas, formando uma área preta com inclinação negativa).

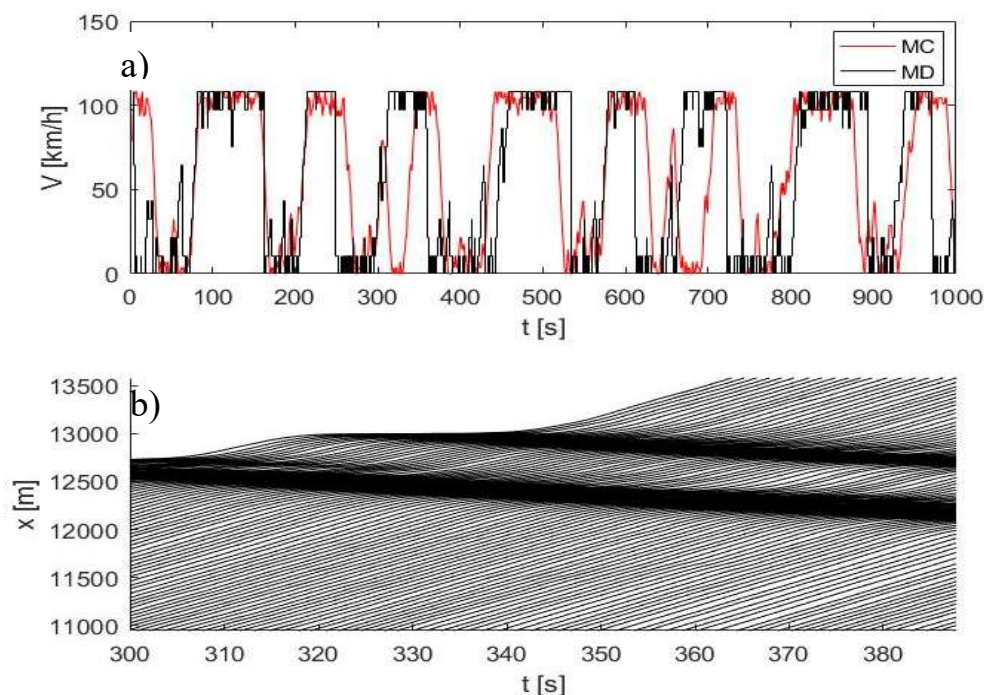


Figura 4: a) Evolução da velocidade de um carro no MC e MD e b) Diagrama das trajetórias para o MC com 300 carros na pista (ou $\rho_c = 40$ carros/km)

Os resultados da simulação de tráfego de carros e motos com diferentes combinações de densidades também mostram que ambos os modelos são capazes de capturar a relação fundamental do tráfego. Nas Figuras 5a e 5b é observado no MC e MD uma forma triangular da relação fundamental para fluxo de carros em densidade de motos 0 e 13,33 (ou 0 e 100 motos na pista) e uma forma parabólica em densidades de moto 40; 93,33 e 186,66 (ou 300, 700 e 1400 motos na pista). Essas formas estão dentro do esperado para relação entre fluxo e densidade (van Wageningen-Kessels *et al.*, 2015). Além disso, foi observado que qualitativamente o uso de MD resulta em comportamento parecido com MC, pois apresenta curvas de fluxo de carros e de motos com tendências semelhantes (Figura 5). No entanto, existem situações em que as diferenças relativas não podem ser ignoradas, por exemplo em $\rho_m = 93,33$. Destaca-se que as relações entre fluxo de motos e densidade (Figuras 5c e 5d) estão de acordo com já observado na literatura (Meng *et al.*, 2007).

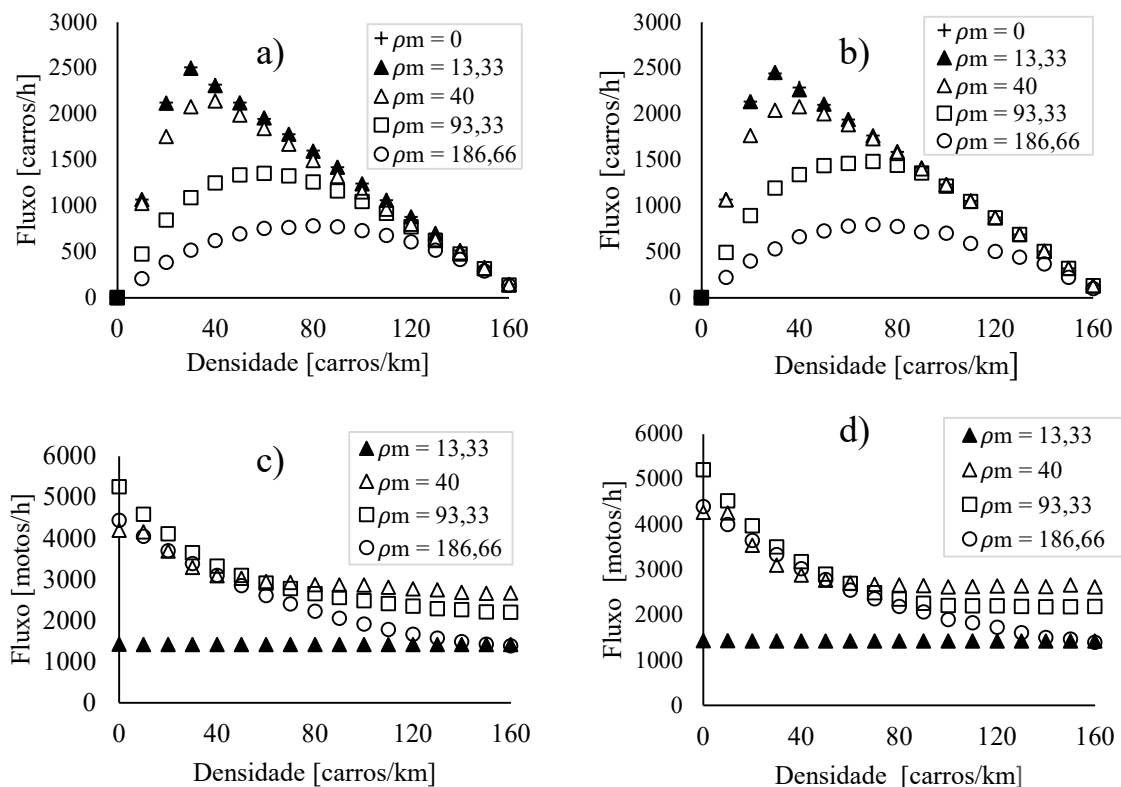


Figura 5: Relação entre fluxo veículos e densidade para a) carros no MC, b) carros no MD, c) motos no MC e d) motos no MD

O *Highway Capacity Manual* (HCM) indica que uma autoestrada com velocidade de fluxo livre (VFL) de 112 km/h tem capacidade de 2.400 ucp/h/f (unidade carro de passeio por hora e por faixa); Rodovia com várias faixas com VFL de 96 km/h tem capacidade no valor de 2.200 ucp/h/f; e Rodovias com duas faixas e dois sentidos tem capacidade de 1.700 ucp/h/f em cada direção (Roess e Prassas, 2014). Os resultados obtidos, apesar de qualitativamente capturarem as relações entre fluxo e densidade, apresentam valores máximo de fluxo mais elevados do que o esperado em condições reais. Esse problema pode ser resolvido por um processo de calibragem dos parâmetros (como aceleração máxima, velocidade máxima, frenagem máxima e probabilidade de frenagem aleatória) para uma situação específica.

Os modelos MC e MD resultaram em valores semelhantes de fluxo médio de carros e motos quando a densidade de motos é mais baixa (menor que 93,33 motos/km), Tabela 2. As maiores diferenças no fluxo de veículos ocorrem em densidades mais altas de moto (maior ou igual a 93,33 motos/km), pois com uma quantidade maior de veículos existe menor liberdade para trafegar e no MD não existe a possibilidade para trafegar com valores de velocidade que não sejam múltiplos de 10,8 km/h. Destaca-se também que as regras para troca de posição na faixa dos modelos são diferentes. O modelo discreto é mais conservador, pois um veículo sempre assume que o veículo imediatamente atrás sempre está trafegando com a velocidade máxima. Já era esperado uma diferença maior no fluxo em densidades mais elevadas de veículos, uma vez que corresponde a situações em que o componente de segurança, definido diferentemente em cada modelo (Equação (2) e Equação (3)), se torna mais relevante. Outro estudo realizado foi a verificação da influência do valor de aceleração no fluxo de veículos em MD. Testes com a_d de 1 m/s² e 2 m/s² não resultaram em diferenças significativas em comparação com a_d de 3

m/s², exceto em $\rho_m = 186,66$ motos/km que apresentou diferenças superiores a 11 %.

Tabela 2: Diferença percentual absoluta entre os fluxos do MC e MD para cada combinação de densidade de carros e motos

ρ_m	Tipo	ρ_c							
		10	30	50	70	90	110	130	150
0	Carro	0%	3%	1%	1%	0%	1%	1%	4%
13,33		0%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	3%
40		4%	2%	1%	4%	6%	9%	9%	0%
93,3		3%	10%	8%	12%	17%	14%	11%	0%
186,6		6%	3%	4%	4%	7%	13%	15%	24%
13,33	Moto	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
40		2%	6%	9%	9%	8%	7%	4%	0%
93,33		1%	4%	6%	10%	12%	9%	5%	2%
186,6		1%	2%	3%	2%	0%	2%	2%	2%

Apesar da semelhança dos resultados do fluxo obtidos com o MC e MD em densidades baixas de motocicletas, é observado uma diferença significativa em relação ao desempenho energético na maioria das combinações de densidades, Figura 7. Nessa figura cada curva representa uma densidade de motos e cada ponto dessa curva indica o consumo de combustível e emissão de CO₂ para uma densidade de carros. O primeiro ponto à esquerda de cada curva representa a maior densidade de carros, 160 carros/km. A densidade de carros aumenta conforme a direção da seta indicada em uma das curvas na figura). A emissão de CO₂ na pista pode ser estimada a partir do consumo total utilizando uma constante de conversão (0,07 Kg de CO₂ por MJ do combustível considerando a combustão completa de iso-octano).

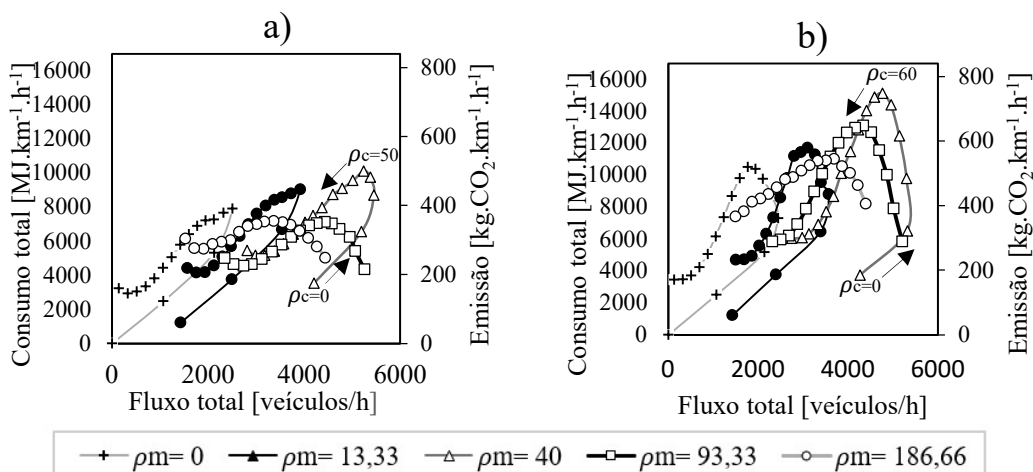


Figura 7: Consumo energético (MJ) e emissão de CO₂ (kg) de todos os veículos na pista por quilometro e por hora para a) MC e b) MD

Uma análise dos valores apresentados nas Figuras 7a e 7b mostra que o consumo de combustível na pista no MD é, em média, 40% maior em relação ao MC considerando todas as combinações de densidades. O consumo chega a ser até 80% maior no MD (na combinação de densidade de 93,33 motos/km e 50 carros/km), pois esse modelo apenas permite acelerar com um único valor (o máximo possível no MC). Somente quando a densidade de veículos é muito baixa que a performance energética dos modelos é semelhante (em $\rho_m=13,33$ motos/km e $\rho_c=20$ carros/km, o consumo no MD é apenas 3% maior). Além disso, se a aceleração única no

MD fosse 2 m/s^2 ou 1 m/s^2 as diferenças em relação ao MC seriam minimizadas, mas ainda existiriam muitos casos em que as diferenças seriam significativas (por exemplo, com 2 m/s^2 o consumo é no máximo 42% maior que o obtido no MC e com 1 m/s^2 o consumo é no máximo 37% maior).

Nesse trabalho os modelos foram implementados em C++ e requereram aproximadamente o mesmo tempo de simulação (6,8 horas para o MC e 6,6 horas para o MD). Em ambos os modelos, o consumo instantâneo foi calculado para cada veículo em cada intervalo de tempo da mesma maneira (Equações 4 e 5). As principais diferenças entre os modelos estão no cálculo da velocidade, do deslocamento e nas condições para trocar de posição na faixa (seções 2.1.1 e 2.1.2). O modelo discreto tem potencial para se tornar mais rápido computacionalmente se o consumo instantâneo for definido previamente para cada valor possível de velocidade constante e combinação de aceleração/velocidade, correspondendo a dados de entrada no simulador. Além disso, o modelo discreto não foi implementado como um autômato celular, ele corresponde a uma adaptação do modelo contínuo para se tornar discreto e funcionar da mesma maneira.

4. Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo apresentar e comparar dois tipos de modelos microscópico de tráfego comumente utilizados para simular o tráfego, um modelo contínuo e outro discreto em relação à velocidade. A diferença principal entre os modelos está na forma que a velocidade é atualizada. Enquanto os veículos no modelo contínuo aceleram com qualquer valor entre zero e a aceleração máxima, no modelo discreto é apenas possível acelerar com um único valor.

Ambos os modelos conseguem capturar qualitativamente relações macroscópicas observadas na pista, como a relação fundamental entre fluxo e densidade. Os resultados também indicam que os modelos requerem aproximadamente mesmo tempo para simulação e estimam o fluxo de veículos de forma semelhante em situações em que não existem motocicletas. A adição de motos em pista torna as iterações entre veículos mais complexas, resultados em condições em que as diferenças não são desprezíveis. Quando há um número relativamente alto de motocicletas na pista (superior a 700) em relação ao número de carros (variando de 75 até 1.200), a diferença entre os fluxos de veículos pode ser superior a 10%.

Além disso, o MD por apenas permitir que os veículos acelerem com um único valor (que corresponde ao máximo do modelo contínuo) resulta em valores mais altos de consumo em relação ao MC na maioria das densidades. Os valores de consumo são mais parecidos quando o número de veículos trafegando na pista é pequeno, pois com liberdade para trafegar há uma menor ocorrência de frenagem e aceleração. Um menor valor de aceleração no modelo discreto diminuiu a diferença de consumo em relação ao modelo contínuo sem resultar em grandes diferenças nos resultados de fluxo, no entanto em vários dos casos a diferença entre os resultados de consumo ainda continua elevada.

Como sugestão para trabalhos futuros, os dois modelos podem ser comparados em uma aplicação de simulação de uma rodovia específica. Tarefa que necessita de dados reais para um processo de calibração dos parâmetros de entrada (como velocidade máxima, aceleração máxima, frenagem máxima e probabilidade de frenagem aleatória) e validação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asaithambi, G., Kanagaraj, V., Srinivasan, K. K., e Sivanandan, R. (2018) Study of traffic flow characteristics using different vehicle-following models under mixed traffic conditions. *Transportation Letters*, 10(2), 92–103. doi:10.1080/19427867.2016.1190887
- Ben-Chaim, M., Shmerling, E., e Kuperman, A. (2013) Analytic modeling of vehicle fuel consumption. *Energies*, 6(1), 117–127. doi:10.3390/en6010117
- Bogo, R. L., Gramani, L. M., e Kaviski, E. (2015) Modelagem computacional do tráfego de veículos pela teoria microscópica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 37(1), 1301. doi:10.1590/s1806-11173711601
- Ciuffo, B., Punzo, V., e Montanino, M. (2012) Thirty Years of Gipps' Car-Following Model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2315(December), 89–99. doi:10.3141/2315-10
- Cossalter, V. (2006) *Motorcycle dynamics*. (2º ed). LULU. doi:9781447532767
- Gipps, P. G. (1981) A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B*, 15(2), 105–111. doi:10.1016/0191-2615(81)90037-0
- Hucho, W. (Ed). (2005) *Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort*. (5º ed). Springer-Verlag. doi:10.1016/C2013-0-01227-3
- Kanagaraj, V., Asaithambi, G., Kumar, C. H. N., Srinivasan, K. K., e Sivanandan, R. (2013) Evaluation of Different Vehicle Following Models Under Mixed Traffic Conditions. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 390–401. doi:10.1016/j.sbspro.2013.11.132
- Kühlwein, J. (2016) Driving Resistances of Light-Duty Vehicles in Europe: Present Situation, Trends and Scenarios for 2025. *The International Council on Clean Transportation (ICCT)*.
- Long, G. (2000) Acceleration characteristics of starting vehicles. *Transportation Research Record*, 1737(00), 58–70. doi:10.3141/1737-08
- Mathew, T., e Ravishankar, K. (2011) Car-following behavior in traffic having mixed vehicle-types. *Transportation Letters*, 3(2), 109–122. doi:10.3328/TL.2011.03.02.109-122
- Meng, J., Dai, S., Dong, L., e Zhang, J. (2007) Cellular automaton model for mixed traffic flow with motorcycles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 380, 470–480. doi:10.1016/j.physa.2007.02.091
- Nagel, K., e Schreckenberg, M. (1992) A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 2(12), 2221–2229. doi:10.1051/jp1:1992277
- Pande, A., e Wolshon, B. (2016) *Traffic Engineering Handbook*. John Wiley & Sons. John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9781119174738
- Richard van Basshuysen, F. S. (2002) *Internal Combustion Engine Handbook*. SAE.
- Roess, R. . P., e Prassas, E. . S. (2014) *The Highway Capacity Manual: A Conceptual and Research History*. (Vol. 5). Springer International Publishing, Cham. doi:10.1007/978-3-319-05786-6
- Sharma, N., Pradeep Kumar, P. V., Singh, A., e Dhyani, R. (2018) Fuel Loss and Related Emissions Due to Idling of Motorized Vehicles at a Major Intersection in Delhi., *Environmental Pollution* (Vol. 77, p. 233–241). Springer. doi:10.1007/978-981-10-5792-2_20
- van Wageningen-Kessels, F., van Lint, H., Vuik, K., e Hoogendoorn, S. (2015) Genealogy of traffic flow models. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 4(4), 445–473. doi:10.1007/s13676-014-0045-5
- Zheng, J., Suzuki, K., e Fujita, M. (2012) Evaluation of Car-following Models Using Trajectory Data from Real Traffic. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 43, 356–366. doi:10.1016/j.sbspro.2012.04.109

Maurício P. M. de Novaes Santos (mauricio.novaessantos@ufpe.br)

Fernando Wesley C. de Araújo (fernando.wesley@ufpe.br)

Guilherme Medeiros S. de Andrade (guilherme.soaresandrade@ufpe.br)

Fábio S. Magnani (fabio.magnani@ufpe.br)

Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologias e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Av. da Arquitetura, SN – Recife, PE, Brasil